基于生态位理论的东北黑土区耕地整治适宜性评价*

——以公主岭市为例

徐小千;汪景宽;李双异;裴久渤;杨骥;张维俊

(沈阳农业大学土地与环境学院　沈阳　110866)

摘　要: 耕地整治是保护耕地的重要举措，耕地整治适宜性评价则是开展耕地整治的重要前提和基础。本研究以生态位理论为基础，以吉林省公主岭市为例，从自然条件、基础设施条件、生态可持续性和空间稳定性 4 个维度选取 14 个指标，采用 Delphi 与 AHP 相结合的方法确定指标权重，在评判影响耕地整治的各项指标实际值(现实生态位)与耕地整治在理想条件下各项指标能够达到的最佳状态(最适生态位)的贴近程度的基础上，确定了三种类型指标的评价模型，并通过加权求和模型计算各评价单元耕地整治生态位适宜度，最终通过 Ward 聚类法将公主岭市耕地整治适宜性划分为 4 个等级，同时引入障碍性因素模型，定量确定不同等级区域耕地整治的障碍性因素，并提出整治的方向和对策。研究结果表明，研究区可分为四个整治区，Ⅰ级高度适宜区生态位适宜度大于 0.746，耕地面积 13 799.89 hm^2，占总耕地面积的 4.16%，主要障碍性因素为农田防护林覆盖率、道路通达度和田块规整度；Ⅱ级中度适宜区生态位适宜度在 0.7 到 0.746 之间，耕地面积 77 754.36 hm^2，占总耕地面积的 23.41%，主要障碍性因素为灌溉条件、道路通达度和农田防护林覆盖率；Ⅲ级轻度适宜区生态位适宜度在 0.611 到 0.7 之间，耕地面积 177 192.38 hm^2，占总耕地面积的 53.36%，主要障碍性因素为土壤有机质含量、距主交通干线距离和土壤 pH；Ⅳ级不适宜区生态位适宜度小于 0.611，耕地面积 63 325.61 hm^2，占总耕地面积的 19.07%，主要障碍性因素为土壤质地、灌溉条件和耕层厚度。研究基于生态位适宜度模型对耕地整治适宜性进行评价，丰富了耕地整治适宜性评价方法，同时评价结果为耕地整治分区建设以及整治方向提供了科学依据。

关键词: 耕地整治；适宜性评价；生态位适宜度模型；东北黑土区

中图分类号: F301.21　　**文献标识码:** A

Suitability evaluation of cultivated land consolidation in black soil zone of northeast China based on niche-fitness model: A case study of Gongzhuling City

XU Xiaoqian, WANG Jingkuan**, LI Shuangyi, PEI Jiubo, YANG Ji, ZHANG Weijun

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Cultivated land consolidation is an important measure to protect cultivated land while the suitability evaluation is an important prerequisite and basis for carrying out cultivated land consolidation. Niche theory is one of the important theories of ecology. The niche-fitness which is based on the connotation of niche can characterize the suitability of each species to their habitat conditions, which is increasingly used in the field of land science study. Similarly, it is used to characterize the suitability of each indexes to cultivated land consolidation. Based on the theory of niche, this paper took Gongzhuling City of Jilin Province as study area, selecting 14 indicators to establish the suitability evaluation index system of cultivated land consolidation from four aspects of natural condition, infrastructure condition, ecological sustainability and spatial stability. Then the method of Delphi combined with AHP was taken to determine the index weight. In this paper, the actual ecological niche of cultivated land consolidation is defined as the real value of index, and the optimal ecological niche is defined as the ideal value of index. Therefore the evaluation models of three types of index were determined on the basis of matching degree between the actual ecological niche and the optimal ecological niche. Based on this, the weighted sum of matching degree was calculated as the niche-fitness value of each evaluation unit. Finally, by Ward method, 4 levels were divided to pinpoint cultivated land consolidation regions. Meanwhile, the optimal niche was proposed as a standard of cultivated land consolidation to establish the diagnosis model of obstacle indicators, clarifying the priority and orientation on cultivated land consolidation in different regions, searching countermeasures and valid paths. The results showed that

the natural condition of the cultivated land in Gongzhuling city were good, and the cultivated land consolidation could be carried out priority in southwest and north. About 13 799.89 hm^2 areas are highly suitable for cultivated land consolidation, accounted for 4.16% of the total cultivated land. They were restricted by farmland shelter belt ratio, road accessibility and field regularity degree. About 77 754.36 hm^2 areas are moderately suitable for cultivated land consolidation, accounted for 23.41% of the total cultivated land. They were restricted by irrigation condition, road accessibility and farmland shelter belt ratio. About 17 7192.38 hm^2 areas are mildly suitable for cultivated land consolidation, accounted for 53.26% of the total cultivated land. They were restricted by soil organic matter content, distance from main traffic line and soil pH. The area unsuitable for carrying out cultivated land consolidation is 63 325.61 hm^2, accounting for 19.07% of the total cultivated land area. While the restrictive factors were soil texture, irrigation condition and topsoil thickness. It is suggested that the relevant departments should carry out corresponding measures of cultivated land consolidation for different regions and implement them orderly in the future. In a word, applying the niche-fitness model to evaluate the suitability of cultivated land consolidation could extend the application range of the theory of ecological niche, providing scientific basis for site selection and consolidation direction of cultivated land consolidation project.

Keywords: Cultivated land consolidation; Suitability evaluation; Niche-fitness model; Black soil zone of northeast China

长期以来农田规划体系的缺失，农田保护意识的薄弱，导致了耕地数量不断减少，质量持续下降。作为我国粮食“稳压器”的东北黑土区，近年来随着耕地粗放、不合理利用致使农田生产力下降，破碎化程度加剧，水土流失问题严峻[1]，作为土地整治主体内容的耕地整治开始扮演着十分重要的角色[2]。耕地整治适宜性评价是耕地整治的基础，是确定耕地整治时序、划定优先整治区的理论依据。因此，科学合理的适宜性评价方法是顺利开展耕地整治的必要步骤。目前对于耕地整治的研究多集中在潜力测算[3-4]、区域划定[5]以及整治项目效益评价[6-7]等方面。在耕地整治适宜性评价研究方面，胡学东等[8]基于贝叶斯概率模型运用已整治耕地指导未整治耕地工作的开展，以此确定耕地整治适宜性等别；还有学者[9-10]基于 GIS 开展耕地整治适宜性评价，运用 GIS 分析功能划分等级。目前耕地整治适宜性评价研究对于指标的选取从耕地的自然条件和基础设施条件方面考虑居多，而对于耕地整治适宜性评价的生态指标方面以及评价后定量确定障碍性因素的研究还仍显薄弱。

生态位理论作为生态学重要理论之一，自提出以来就受到了学者们的广泛关注，之后不断发展、延伸，在综合分析生态位内涵基础上提出的生态位适宜度表征了物种对其生境条件的适宜性，因而能够较好体现不同物种对于生境条件的适宜程度并以此分析得出限制物种生长的障碍性因素[11-12]。鉴于此，可以通过最适生态位解释耕地整治标准，利用区域耕地现实生态位与最适生态位的差异程度划分整治的适宜性等级并提出障碍因素，以此确定整治的优先级和整治的重点。随着对该理论研究的深入，生态位理论不仅仅应用于生物方面，越来越多的学者将其引入到更多的研究领域中，尤其是土地方面，如曾庆敏等[13]应用生态位适宜度模型进行宜耕未利用地开发适宜性评价，念沛豪等[14]构建生态位理论的功能评价模型并依据评价结果进行国土功能分区，还有学者[15-16]将生态位适宜度模型引入到农村居民点分区与适宜性评价中。这些研究的顺利开展，为土地研究领域从生态学角度发现、认识规律，解决相关问题提供了新思路和新方法。目前利用生态位适宜度模型进行评价时大多应用 Shefold 限制性定律运用几何平均值对各指标的生态位适宜度值进行刻画[17]，而作为粮食主产区的黑土区在开展耕地整治时在注重生态整治的基础上还应重点关注耕地本底条件，且不同影响条件对于耕地整治的影响程度不同。因此，对于黑土区开展耕地整治适宜性评价时应增加相应指标的权重。

基于此，本研究以东北典型黑土区公主岭市为例，在指标选取上不仅从自然条件和基础设施条件方面考虑，同时增加了生态可持续性和空间稳定性方面的指标，并采用 Delphi 和 AHP 法确定指标权重，运用加权求和的生态位适宜度模型计算各评价单元的生态位适宜度值，最终划分研究区耕地整治适宜性等级，并统计各个整治等级的障碍性因素，以此提出不同等级耕地整治的重点和方向，以期为东北黑土区耕地整治项目选址以及确定建设时序提供科学依据。

1　研究区概况及数据来源

1.1　研究区概况

公主岭市位于吉林省中西部(图 1)，东辽河中游右岸，124°02′~125°18′E、43°11′~44°09′N，东接长春、农安，西与梨树，双辽为邻，南与伊通接壤，北临长岭，属温带大陆性季风气候，冬冷夏热，年平均气温 5.6 ℃，年平均降水量 594.8 mm。耕地面积 332 072.24 hm^2，占土地总面积的 80.18%。公主岭市地貌类型分为南部山地和西北部平原两大类型区，南部地区坡度较大，耕地较少，水土流失严重；西北部地势平坦，虽然耕地面积较大，但土壤贫瘠；中、东部区域地势起伏，多为漫岗台地。

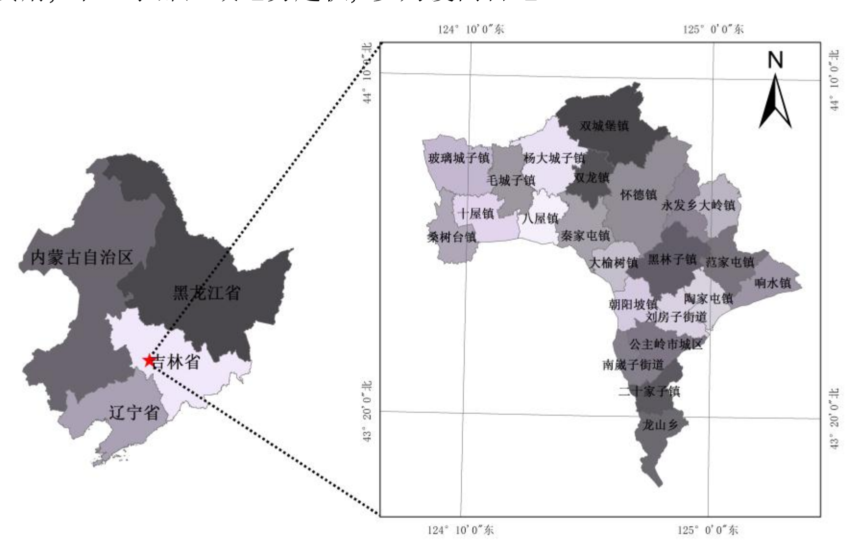


图 1　公主岭市位置图

Fig. 1　Location of Gongzhuling City in in black soil zone of northeast China

1.2　数据来源

公主岭市实地采样数据、调研数据、第2次土地调查数据库，东北黑土区耕地质量评价数据库, 30 m数字高程图(DEM)，耕地地力评价资料，第2次土壤普查资料，地貌图、行政区划图、《公主岭市统计年鉴(2014)》等。

2　研究方法及模型

2.1　研究思路

耕地整治是土地整治的重要部分，是指在耕地资源现状条件的基础上，通过实施整治工程，实现增加耕地数量、提高耕地质量的目标。耕地整治适宜性评价则是判断耕地整治优先级的基础，也是制定土地整治规划的关键。具体研究思路，①通过图层叠加确定评价单元；②从影响耕地整治的自然条件、基础设施条件、生态可持续性和空间稳定性等方面选取评价指标构建评价指标体系；③采用 Delphi 与 AHP 相结合法确定指标权重；④运用加权求和模型确定各评价单元的生态位适宜度；⑤采用 Ward 聚类法划分适宜性等级；⑥根据评价结果确定各等级耕地整治的限制性因素及整治方法对策。

2.2　研究方法

生态位适宜度在生态学中表示物种对其生境条件的适宜性。当现实资源条件满足物种需求时，生态位适宜度为 1，反之，现实资源条件不满足物种需求时，生态位适宜度为 0[12]。本研究将耕地在现实资源条件下实施整治的适宜程度类比为物种对其生存环境的适宜程度，因此将生态位适宜度模型引入到耕地整治适宜性评价中。当现实的耕地资源条件满足耕地整治的需求时，生态位适宜度为 1，反之，现实的耕地资源条件不满足耕地整治条件时，生态位适宜度为 0。

假定影响耕地整治有 n 个指标，如，土壤有机质含量、有效土层厚度、土壤 pH 等，各指标实际值为 x_1，x_2，x_3，L L ，x_n，则 $X=(x_1, x_2, x_3, \text{L L}, x_n)$表示耕地的现实生态位，所有影响耕地整治的各指

标值的集合构成了一个 n 维的资源空间(E^n)，其中存在 X_{opt}=(x_{1opt}，x_{2opt}，x_{3opt}，L L ，x_{nopt})使得耕地整治达到最佳状态，则称 X_{opt} 为耕地整治的最适生态位[11]。现实生态位 X 与最适生态位 X_{opt} 的贴近程度称为耕地整治的生态位适宜度(NF)，$NF=\lambda(X_i, X_{opt})$，X_i，$X_{opt}\in E^n$，$NF\in[0, 1]$，NF 值越大说明该耕地越适宜开展整治，反之越不适宜。

通常影响耕地整治的因素可以分为 3 类[18]：第 1 类是正向型，即资源条件越优越好，如土壤有机质含量、有效土层厚度等。该类型指标的评价模型为：

$$NF_i=\begin{cases}0 & X_i<X_{i\min}\\ \dfrac{X_i}{X_{iopt}} & X_{k\min}\le X_i<X_{iopt}\\ 1 & X_i\ge X_{iopt}\end{cases}\qquad(1)$$

式中：NF_i 为影响耕地整治的各评价指标的生态位适宜度值；X_i 为评价指标 i 的现实生态位；$X_{i\min}$ 为评价指标 i 的生态位的最小值；X_{iopt} 为评价指标 i 的最适生态位。

第 2 类是适度型，耕地整治对各指标的需求在资源可供给范围内存在一个适宜区间，不能超过最大值也不能低于最小值，如：pH 值。该类型指标的评价模型为：

$$NF_i=\begin{cases}0 & X_i\le X_{i\min}, X_i\ge X_{i\max}\\ \dfrac{X_i-X_{i\min}}{X_{iopt}-X_{i\min}} & X_{i\min}<X_i<X_{iopt}\\ \dfrac{X_{i\max}-X_i}{X_{i\max}-X_{iopt}} & X_{iopt}<X_i<X_{i\max}\end{cases}\qquad(2)$$

式中：$X_{i\max}$ 为评价指标 i 的生态位的最大值。

第 3 类是负向型，即指标值越小越好，如田面坡度。该类型指标的评价模型为：

$$NF_i=\begin{cases}1 & X_i\le X_{iopt}\\ 1-\dfrac{X_i-X_{iopt}}{X_{i\max}-X_{iopt}} & X_{iopt}<X_i<X_{i\max}\\ 0 & X_i\ge D_{i\max}\end{cases}\qquad(3)$$

2.3 基于生态位适宜度模型的耕地整治适宜性评价

2.3.1 评价单元的确定

本研究将公主岭市第 2 次全国土地调查数据库中耕地图斑图层，与公主岭市耕地质量评价数据库中耕地图斑图层、土壤图相叠加，将小于 5 m^2 的图斑合并，最终得到公主岭市耕地整治适宜性评价单元图，共 45 085 个评价单元。

2.3.2 评价指标体系构建

黑土区作为我国重要的粮食供应地，近年来水土流失问题严重，土壤肥力降低，耕层变薄，且多年的雨养农业使该地区对于基础设施条件关注不足。且自十七大提出生态文明以来，耕地整治的内涵已经从早期的仅增加耕地数量逐渐转移到追求质量的提高和生态条件的改善。因此，本研究根据黑土区耕地现状及数据可获取性，结合已有的耕地整治的研究成果[8-9]，遵循科学性、代表性、区域差异性和可操作性的原则，

除了自然条件和基础设施条件外，增加了生态可持续性和空间稳定性方面可以表征耕地整治生态意义的评价指标。

自然条件选取了田面坡度、土壤有机质含量、土壤质地、耕层厚度和有效土层厚度5个指标。田面坡度能够在一定程度上反映水土流失发生的概率；土壤有机质含量是影响土壤肥力的重要指标，土壤质地能体现耕地的耕作性能，二者均能反映耕地的生产力水平；耕层和有效土层为作物生长提供养分和水分，其厚度能够一定程度上反映土壤肥沃程度。基础设施条件选取了灌溉条件、排水条件和道路通达度3个指标。灌排条件反映了耕地的抗旱排涝能力；道路通达度体现耕地的交通状况。生态可持续性选取了土壤pH、土壤污染程度和农田防护林覆盖率3个指标。土壤pH对土壤肥力影响较大且盐碱地不利于农田的生态发展；土壤污染程度反映土壤受污染的状况；农田防护林覆盖率影响着耕地及其周围的生态环境，对于调节农田周围的小气候有重要作用。空间稳定性选取了田块规整度和耕地连片度2个指标，这两个指标对于提高农田机械化率，稳定耕地的利用方式起到了重要作用。

各评价指标主要分为连续型和离散型两种类型。连续型指标可以通过指标涵义及公式进行计算处理，离散型指标依据专家意见进行分级赋值处理，如表1所示。

(1)土壤自然条件：有效土层厚度、耕层厚度、土壤有机质含量、土壤 pH、土壤质地均通过以东北黑土区耕地质量评价数据库为基础，结合实地调研、实验分析进行修正确定。

(2)田面坡度：应用 ArcGIS10.2 软件，从分辨率为 30 m 的 DEM 中运用 3D 分析工具提取坡度，然后通过 Spatial Analyst 工具将坡度值赋到评价单元上。

(3)道路通达度：表征农田中道路通达程度，由道路密度指数和道路影响指数共同表征(公式 4)。

$$田间道通达度=\frac{道路密度指数+道路影响指数}{2} \tag{4}$$

$$道路密度指数=\frac{\sum 图斑内道路长度}{图斑面积} \tag{5}$$

$$道路影响指数=1—\frac{d}{D} \tag{6}$$

式中：d 为评价单元的几何重心到最近道路的垂直距离(单位：m)；D 为农田中道路的影响距离(单位：m)，在实地考察东北黑土区道路现实情况的基础上，参考专家和学者的研究成果[19]，将 D 值确定为 600 m。

(4)农田防护林覆盖率：农田周围建设防护林可以起到防风固沙、保护农田的作用，本研究依据《高标准农田建设标准》(NY/T 2148－2012)中防护林面积的总和占耕地面积的比值进行刻画(公式 7)。

$$农田防护林覆盖率=\frac{\sum 防护林地面积}{耕地面积} \tag{7}$$

(5)距主交通干线距离：田块重心到主交通干线的垂直距离。本研究认为距离主交通干线越近的田块在空间上越不稳定，因为在主交通干线两旁的农田有可能因扩建公路等原因改变其利用方式，因此该指标为正向指标，距主交通干线越远，空间稳定性越好。

(6)田块规整度：本研究借用景观生态学的斑块规整度(PD)来量化耕地图斑外形的规整程度，计算田块边缘复杂性[20]。PD 理论范围为 1.0~2.0，当 PD=1.0，田块形状为正方形；当 PD=2.0，为等面积下周边最复杂的田块(公式 8)。

$$PD=\frac{2\ln(P/4)}{\ln(A)} \tag{8}$$

式中：PD 为田块规整度；P 为单元田块的周长(单位：m)；A 为单元田块的面积(单位：m^2)

(7)耕地连片度：用以描述田块连片性程度。现实情况中因为有田间道路、林带、沟渠等地物，因此田块之间存在一定距离，距离越小，说明连片性越好[21]。参考前人的研究成果[22]和第 2 次土地调查的最小上图宽度，本研究将这一距离确定为 20 m，当田块间的距离小于 20 m 时，则认为耕地具有连片性。首先，运用 ArcGIS10.2 缓冲区分析功能，计算连片区域面积，然后，通过 Classification 功能中 Standard Deviation 方

法，将耕地连片图斑面积划分 5 个等级，最后，将耕地连片度从高到底依次赋值为 1.0、0.8、0.6、0.4、0.2。

(8)土壤污染程度：对于土壤污染程度指标，本研究采取一票否决制，只要田块中存在污染，那么该地块就不适宜实施耕地整治。

(9)灌排条件：水利基础设施直接影响粮食作物的生长情况，因此灌排条件的优劣将影响耕地整治的适宜性程度。本研究灌排条件数据通过公主岭市水利志、统计年鉴及现场调研获取。灌排条件均分为 3 个等级，即充分满足、基本满足和不满足。灌溉条件的“充分满足”指田间有健全的灌溉设施，能够完全满足作物的生长需求；“基本满足”指田间的灌溉设施基本满足作物的生长需求；“不满足”指灌溉设施不能满足作物的生长需求，在大旱年作物容易死亡。排水条件的“充分满足”，田间有健全的排水沟渠，不会发生洪涝灾害；“基本满足”田间的排水条件一般，暴雨后会有短暂的洪涝发生(田间积水≤2 d)；“不满足”田间基本没有排水系统，暴雨后极易发生洪涝灾害(田面积水≥3 d)。

表 1 公主岭市耕地整治适宜性评价离散型指标分级分值

Table1 Classification score of discrete index of suitability evaluation on cultivated land consolidation in Gongzhuling City

指标层 Index layer	分级 Classification	类型 Type	分值 Score
土壤质地 Soil texture	1	壤土 Loam	1
	2	粘壤土 Clay loam	0.8
	3	黏土 Clay	0.6
	4	砂土 Sand	0.4
灌溉条件 Irrigation condition	1	充分满足 Complete satisfaction	1
	2	基本满足 Basic satisfaction	0.8
	3	不满足 Non-satisfaction	0.5
排水条件 Drainage condition	1	充分满足 Complete satisfaction	1
	2	基本满足 Basic satisfaction	0.8
	3	不满足 Non-satisfaction	0.5
土壤污染程度 Soil pollution degree	1	不污染 Non-polluting	1
	2	污染 Polluting	0

2.3.3 指标权重及最适值的确定

本文采用 Delphi 与 AHP 相结合的方法确定指标权重，首先根据专家对准则层和指标层重要程度的排序构造判断矩阵，然后计算特征向量，最后进行一致性检验，一致性比率均小于 0.1，通过一致性检验，各评价指标的权重值见表 2。

影响耕地整治的各评价指标均存在一个最适值，最适值确定的合适与否直接影响指标的生态位适宜度值。高标准农田建设是耕地整治的重要方式，耕地整治中的土壤质地、有效土层厚度、耕层厚度、土壤 pH、灌溉条件、排水条件、农田防护林覆盖率等指标最适值的确定依据我国已经颁布的《高标准基本农田建设标准》、《高标准农田建设标准》和《农用地质量分等规程》。土壤有机质含量的最适值参考第 2 次土壤普查的分级标准。道路通达度和耕地连片度都是正向指标，指标值越大越好，选取最大值 1 定为最适值。田块规整度、土壤污染程度和田面坡度为负向指标，选取指标值范围内的最小值为最适值。距主交通干线距离根据现场调查确定最适值。各指标的最适值见表 2。

表 2 公主岭市耕地整治适宜性评价指标、权重及最适值

Table 2 Evaluation index system, weight and optimal niche of suitability evaluation on cultivated land consolidation in Gongzhuling City

准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	指标类型 Index type	权重 Weight	最适值 Optimum niche
自然条件 Natural condition	田面坡度 Field slope(°)	正向连续型 Negative Continuous	0.0987	0°
	土壤质地 Soil texture	正向离散型 Positive Discrete	0.1070	壤土
	有效土层厚度 Effective soil layer depth(cm)	正向连续型 Positive Continuous	0.0859	100

	土壤有机质含量 Soil organic matter content(g kg^{-1})	正向连续型 Positive Continuous	0.0493	40
	耕层厚度 Topsoil thickness(cm)	正向连续型 Positive Continuous	0.0523	20
基础设施条件 Infrastructure condition	灌溉条件 Irrigation condition	正向离散型 Positive Discrete	0.0778	充分满足
	排水条件 Drainage condition	正向离散型 Positive Discrete	0.0327	充分满足
	道路通达度 Road accessibility	正向连续型 Positive Continuous	0.1234	1
生态可持续性 Ecological sustainability	土壤 pH Soil pH	适度连续型 Moderate Continuous	0.0574	6.0~7.0
	土壤污染程度 Soil pollution degree	负向离散型 Negative Discrete	0.0455	0
	农田防护林覆盖率 Farmland shelter belt ratio(%)	正向连续型 Positive Continuous	0.0361	3%
空间稳定性 Space stability	距主交通干线距离 Distance from main traffic line (km)	正向连续型 Positive Continuous	0.0382	2
	田块规整度 Field regularity degree	负向连续型 Negative Continuous	0.0694	1
	耕地连片度 Field contiguous degree	正向连续型 Positive Continuous	0.1262	1

2.3.4 耕地整治生态位适宜度值的计算

首先依据 2.3.2 计算 45 085 个评价单元的 14 项评价指标的指标值，然后根据公式(1)、(2)和(3)计算出每个评价单元中 14 项评价指标的生态位适宜度，依据表 2，采用加权求和模型计算各评价单元的耕地整治生态位适宜度 *NF*，其公式如下:

$$NF = \sum_{i=1}^{n} w_i \times NF_i \qquad (9)$$

式中: *NF* 为耕地整治生态位适宜度值； w_i 为第 i 项评价指标的权重值; *n* 为评价指标个数； NF_i 为影响耕地整治的各评价因子的生态位适宜度值。

2.3.5 障碍因素的确定

耕地整治的障碍因素指在耕地现实资源条件下影响耕地整治的限制性条件，各评价指标的生态位适宜度表示指标在现实条件下对于开展耕地整治的适宜程度，指标生态位适宜度值越大表示其现实条件越符合耕地整治的要求，反之，生态位适宜度值越小则表示其现实条件越不适宜开展耕地整治，即为耕地整治的障碍性因素。具体，首先计算各评价指标的生态位适宜度值乘以其权重 $w_i \times NF_i$，然后选出每个评价单元中最小的三个 $w_i \times NF_i$ 值所对应的指标作为该评价单元的障碍因素，最后分别统计各个整治等级障碍性因素的频率，取频率最大的三个为每个整治等级的障碍性因素[17,23]。

3 结果与分析

3.1 耕地整治适宜性评价等级划分

计算出公主岭市各评价单元的 *NF* 值在 0.521~0.797 之间，本文应用系统聚类法中的 Ward 法划分耕地整治适宜性等级。目前，比较常用的聚类方法有系统聚类法(层次聚类法)、K-mean 聚类法和二阶聚类法。Ward 系统聚类法的优点是分类后，同类事物的内部差异小，不同类别差异较大，符合耕地整治适宜性等级的划分要求[24]。具体，以 SPSS23.0 的 Classify Analysis 模块为工具，对 45 085 个 *NF* 值采用 Ward 法进行聚类分析，通过分析相关系数和谱系图，将 45 085 个 *NF* 值聚为四类。对聚类结果首先进行单因素 ANOVA 检验，经检验显著性水平 p<0.01，说明分类合理。然后进行随机抽样检验，进一步检验聚类结果与实际情况的相符性，对四个聚类各取 20 个地块与耕地现实状况进行比对发现 98%的样本地块与耕地现实情况相符，说明分类结果基本符合现实情况，具有一定的指导意义(表 3)。

表 3 公主岭市耕地整治适宜性等级划分结果

Table 3 Grading standard of suitability evaluation on cultivated land consolidation in Gongzhuling City

级别	生态位适宜度(NF)

Grade	Niche fitness value
Ⅰ级 First grade	≥0.746
Ⅱ级 Second grade	0.700~0.746
Ⅲ级 Third grade	0.611~0.700
Ⅳ级 Fourth grade	<0.611

3.2 公主岭市耕地整治适宜性评价结果及整治措施

运用 ArcGIS10.2 将聚类结果与空间数据相连接得到公主岭市耕地整治适宜性评价结果图(图 2)、各等别耕地面积及比例(表 4)，具体等级区如下:

表 4　公主岭市耕地整治适宜性评价结果及障碍因素

Table 4　Results and obstacle factors of suitability evaluation on cultivated land consolidation in Gongzhuling City

级别 Grade	面积 Area(hm²)	比例 Proportion(%)	主要分布区域 Main distribution region	主要障碍因素 The main obstacle factors	生态位适宜度均值 Niche fitness mean value
Ⅰ级 First grade	13 799.89	4.16	南崴子街道、苇子沟街道、八屋镇、双龙镇东部 Nanwaizi Street, Weizigou Street, Bawu Town, east of Shuanglong Town	农田防护林覆盖率 Farmland shelter belt ratio	0.46
				道路通达度 Road accessibility	0.60
				田块规整度 Field regularity degree	0.68
Ⅱ级 Second grade	77 754.36	23.41	秦家屯镇、大榆树镇、朝阳坡镇、响水镇、双城堡镇 Qinjiatun Town, Dayushu Town, Chaoyangpo Town, Xiangshui Town, Shuangchengbao Town	灌溉条件 Irrigation condition	0.56
				道路通达度 Road accessibility	0.61
				农田防护林覆盖率 Farmland shelter belt ratio	0.62
Ⅲ级 Third grade	177 192.38	53.36	双龙镇、怀德镇、黑林子镇、永发乡、大岭镇、范家屯镇、陶家屯镇、桑树台镇、毛城子镇、二十家子镇、龙山乡 Shuanglong Town, Huaide Town, Heilinzi Town, Yongfa Town, Daling Town, Fanjiatun Town, Taojiatun Town, Sangshutai Town, Maochengzi Town, Ershijiazi Town, Longshan Town	土壤有机质含量 Soil organic matter content	0.48
				距主交通干线距离 Distance from main traffic line	0.52
				土壤 pH Soil pH	0.57
Ⅳ级 Fourth grade	63 325.61	19.07	玻璃城子镇、十屋镇、杨大城子镇、刘房子镇 Bolichengzi Town, Shiwu Town, Yangdachengzi Town, Liufangzi Town	土壤质地 Soil texture	0.47
				灌溉条件 Irrigation condition	0.52
				耕层厚度 Topsoil thickness	0.54

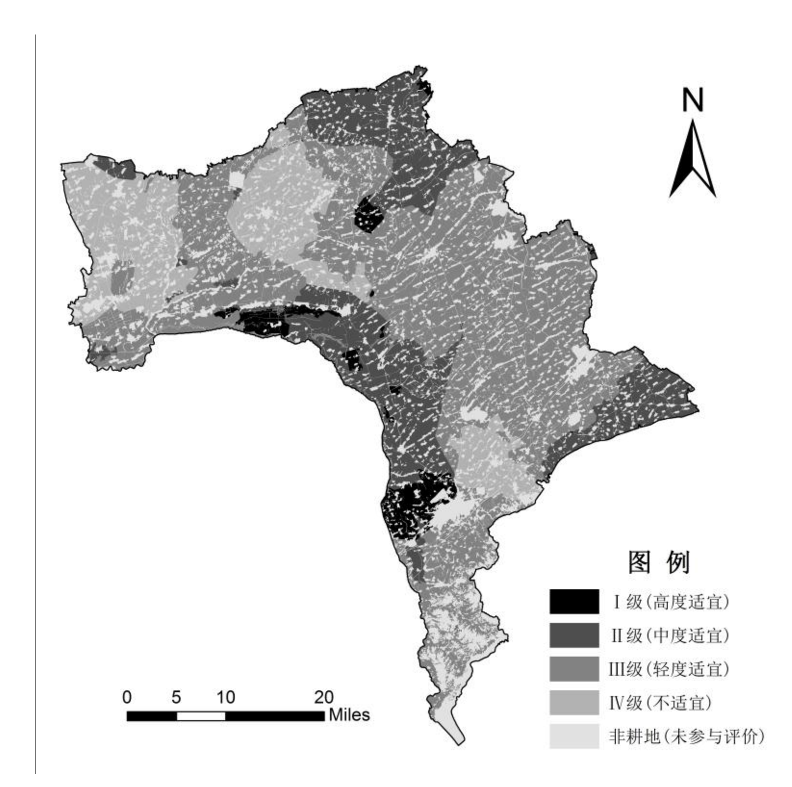


图 2 公主岭市耕地整治适宜性等级分布图

Fig. 2 Suitability grading distribution diagram of suitability evaluation on cultivated land consolidation in Gongzhuling City

(1) Ⅰ级区域。Ⅰ级区域为高度适宜开展耕地整治区，耕地面积为 13 799.89 hm^2，占总耕地面积的 4%，主要分布在公主岭市西南部的南崴子街道、苇子沟街道、八屋镇和双龙镇东部。该区域耕地状态良好，适宜优先开展耕地整治，区域耕地土层深厚，土壤有机质含量高，没有污染，土壤质地以壤土和黏壤土为主，基础设施条件基本良好。区域内前三的障碍性因素为农田防护林覆盖率，道路通达度和田块规整度，这三个指标的生态位适宜度的平均值分别为 0.46, 0.60 和 0.68。从障碍性因素来看，农田防护林覆盖率是限制该区域耕地整治的首要因素，今后应加大农田防护林网建设，农田防护林不仅可以防风固沙，涵养水源，而且能够改善农田周围小气候，有利于保护农田生态系统。此外，道路通达度和田块规整度也制约着Ⅰ级区域耕地整治的建设，建议今后，修整道路，征求农民意见，重新规划田块形状，提高耕作效率。

(2)Ⅱ级区域。Ⅱ级区域为中度适宜开展耕地整治区，耕地面积为 77 754.36 hm^2，占总耕地面积的 23%，主要位于公主岭市南部的秦家屯镇、大榆树镇、朝阳坡镇，北部的响水镇和东部双城堡镇。此区域耕地情况从准则层来看自然条件和空间稳定性均良好，制约耕地整治的主要因素是基础设施条件中的灌溉条件、道路通达度和生态可持续条件中的农田防护林覆盖率，公主岭市耕地种植属于雨养农业，田间缺少灌溉措施，灌溉条件的生态位适宜度的平均值仅为 0.56，限制该区域耕地整治，今后应着重提升灌溉设施的建设，提升区域的农田灌溉保证率。道路通达度和农田防护林覆盖率的生态位适宜度的均值分别为 0.61 和 0.62。因此，建议该区域同Ⅰ级区域一样，修整田间道路，使田块与田块之间、田块与居民点之间保持交通便利，提高机械化作业效率；根据农田特点以及公主岭市气候、土壤等自然条件科学合理布设防农田护林网。

此外，在实地调查中发现，该区域小型农机具的普遍使用使得土壤板结现象严重，犁底层变厚，土壤蓄水能力不足。建议区域使用大型机械统一集中作业，三至五年深翻一次，打破犁底层，增加耕层厚度，改善土壤通透性。

(3)Ⅲ级区域。Ⅲ级区域为轻度适宜开展耕地整治区，耕地面积为 177 192.38 hm^2，占总耕地面积的 53%，主要分布在公主岭市的中东部的双龙镇、怀德镇、黑林子镇、永发乡、大岭镇、范家屯镇和陶家屯镇，西部的桑树台镇、毛城子镇和南部的二十家子镇、龙山乡。西部地区地势较为平坦，中东部区域地势稍有起伏，有漫岗漫川，南部地区地貌类型多丘陵和山地。该区域土壤有机质含量较低，田块不规整，道路通达度一般，缺少灌溉设施，抗旱能力差，有沙化土壤，生态可持续性差。这类地区耕地整治较难，耕地自然禀赋差，且缺乏基础设施，建议作为耕地整治后备区域。限制该区域耕地整治的前三个因素为土壤有机质含量、

距主交通干线距离和土壤 pH，生态位适宜度值分别为 0.48、0.52 和 0.57。对于土壤贫瘠区域，建议增施有机肥，实施测土配方施肥，推广秸秆还田模式；距主交通干线距离近的田块空间稳定性差，易被改变土地用途，不建议开展耕地整治，可以结合公主岭市土地利用总体规划及农村土地流转政策等改变土地用途，提高土地利用效率；部分区域有盐碱地，限制了作物生长，建议通过物理、化学或生物措施改良土壤，或种植适宜作物。北部的III级区域位于丘陵山地区，坡度成为其主要的限制性因素，其生态位适宜度均值为0.46，建议今后通过土地平整工程减缓土地坡度，或建造梯田，或还林还草。

(4)Ⅳ级区域。Ⅳ级区域为不适宜开展耕地整治区，耕地面积为63 325.61 hm^2，占总耕地面积的19%，主要位于玻璃城子镇、十屋镇、杨大城子镇和刘房子镇。该区域前三的障碍因素为土壤质地、灌溉条件和耕层厚度，生态位适宜度分别为 0.47、0.52 和 0.54。部分风蚀沙化区土壤质地为砂土，建议改良土壤质地，对于严重地区可实行客土、表土剥离等整治工程。此区域土壤沙化严重，有机质含量低，土层薄，基本无灌溉、排水设施，缺少农田防护林网，不适宜开展耕地整治，建议今后以保护生态环境为主，退耕还林还草，开发休闲农业等。

4 讨论与结论

公主岭市位于吉林省中部，是东北典型黑土区的代表区域，区域耕地多年重用轻养，掠夺式利用，造成了耕地质量下降，土层变薄，进而影响粮食产量。因此因地制宜、生态、高效的耕地整治是目前保护黑土区的重大课题。本研究借助生态位适宜度模型对公主岭市耕地整治适宜性进行了探讨，研究采用加权法的生态位适宜度模型量化各评价单元的生态位适宜度值，以往的研究多通过计算各评价指标的几何平均值表征各评价单元的生态位适宜度，难以突出不同指标对于生态适宜度的影响程度，黑土区是我国粮食供应的重点区域，其耕地整治应在兼顾生态治理的同时重点关注耕地地力水平，因此加权求和模型能够很好体现各评价指标对公主岭市耕地整治的不同影响程度。在指标体系建立过程中选择了土壤 pH、土壤污染程度、农田防护林覆盖率以及距主公路距离等能够表征耕地生态整治需求的指标，但仍有不足，考虑今后可增加土壤侵蚀情况等反映黑土区水土流失等特殊情况的指标进行深入研究。研究结果显示，公主岭市高度适宜区耕地面积 13 799.89 hm^2，占总耕地面积的 4.16%，主要障碍性因素为农田防护林覆盖率、道路通达度和田块规整度；中度适宜区耕地面积 77 754.36 hm^2，占总耕地面积的 23.41%，主要障碍性因素为灌溉条件、道路通达度和农田防护林覆盖率；轻度适宜区耕地面积 177 192.38 hm^2，占总耕地面积的 53.36%，主要障碍性因素为土壤有机质含量、距主交通干线距离和土壤 pH；不适宜区耕地面积 63 325.61 hm^2，占总耕地面积的 19.07%，主要障碍性因素为土壤质地、灌溉条件和耕层厚度。研究结果与公主岭市耕地现状基本吻合，说明本研究的方法科学可行，研究结果有一定的实用价值。

本研究将生态位适宜度评价模型引入耕地整治适宜性评价中，从自然条件、基础设施条件、生态可持续性和空间稳定性四个方面构建了东北典型黑土区公主岭市耕地整治适宜性评价指标体系，以最适生态位作为耕地整治的标准，科学划分公主岭市耕地整治区域并定量确定障碍性因素。结果表明公主岭市耕地自然条件整体良好，耕地整治高度适宜区(Ⅰ级)和中度适宜区(Ⅱ级)主要位于公主岭市西南部和北部，耕地面积为 91 554.24 hm^2，占总耕地面积的 27%。其主要限制因素为灌溉条件、农田防护林覆盖率、田块规整度以及道路通达度。建议相关部门今后分区开展耕地整治，对于不同区域采取相应的整治措施。借助生态位适宜度模型研究耕地整治适宜性，丰富了耕地整治理论体系和研究方法，促进了耕地整治规划与现代生态学理论的交叉、渗透和融合，为公主岭市开展耕地整治提供了一定的理论依据。

参考文献 References

[1] 张立江，汪景宽，裴久渤，等. 东北典型黑土区耕地地力评价与障碍因素诊断[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(01):110-117.

Zhang L L, Wang J K, Pei J B, et al. Evaluation of cultivated land fertility and its obstacle factors diagnosis in the typical black soil area of northeast China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(01):110-117.

[2] 黄文山, 周晓燕. 新时期耕地保护问题探讨[J]. 中国土地, 2011, (02):25-27.

Huang W S, Zhou X Y. Discussion on cultivated land protection in the new period[J]. China land, 2011, (02):25-27.

[3] 马春艳，王占岐，易 平. 基于ArcGIS的耕地整治潜力测算与分级研究——以湖北省房县为例[J].水土保持研究, 2015, 22(1):207-211.

Ma C Y, Wang Z Q, Yi P.Study on the potential calculation and classification of farmland remediation based on ArcGIS-A case study on Fang county[J]. Research of soil and water conservation, 2015, 22(1):207-211.

[4] 唐秀美，潘瑜春，郝星耀，等. 中国耕地整治生态潜力测算方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17):270-277.

Tang X M, Pan Y C, Hao X Y, et al. Calculation method of cultivated land consolidation ecological potential in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17):270-277.

[5] 张杰，赵瑞东，田超，等. 基于限制程度排序的卢龙县耕地质量提升重点区域划定研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3):429-440.

Zhang J, Zhao R D, Tian C, et al. Delineation of key areas of cultivated land quality improvement in Lulong County based on restriction degree[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3):429-440.

[6] 李冰清，王占岐，金贵. 新农村建设背景下的土地整治项目绩效评价[J]. 中国土地科学, 2015, 29(3):68-74, 96.

Li. B Q, Wang Z Q, Jin G. Performance Evaluation of Land Consolidation Project in the Context of the New Countryside Development[J]. China Land Science, 2015, 29(3):68-74, 96.

[7] 杜鑫昱，夏建国，章大容. 四川省土地整理项目绩效评价[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4):514-524.

Du X Y, Xia J G, Zhang D R. Evaluation of performance of land consolidation projects in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4):514-524.

[8] 胡学东，王占岐，邹利林. 基于贝叶斯概率模型的鄂西北山地区耕地整治适宜性评价[J]. 资源科学, 2016, 38(01):83-92.

Hu X D, Wang Z Q, Zhou L L. Suitability evaluation of arable land consolidation in mountain areas of Northwestern Hubei based on Bayesian Probability Modeling[J]. Resources Science, 2016, 38(01):83-92.

[9] 张跃星，周建. 基于GIS的土地整治适宜性评价——以岑巩县为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版)，2014, 32(05) :28-31.

Zhang Y X, Zhou J. A evaluation of land consolidation suitability based on GIS-A case study of Cengong county[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences), 2014, 32(05) :28-31.

[10] 崔勇，刘志伟. 基于GIS的北京市怀柔区高标准基本农田建设适宜性评价研究[J]. 中国土地科学，2014, 28(09):76-81.

Cui Y, Liu Z W. A GIS-based Approach for Suitability Evaluation of High Standard Primary Farmland Consolidation: A Case from Huairou in Beijing[J]. China Land Sciences, 2014, 28(9):76-81.

[11] Hutchinson G E. Concluding Remarks[J]. Cold Spring Harbor Symposium On Quantitative Biology, 1957, 22: 415-427.

[12] 李自珍，赵松岭，张鹏云. 生态位适宜度理论及其在作物生长系统中的应用[J]. 兰州大学学报, 1993, 29(04): 219-224.

Li Z Z , Zhao S L , Zhang P Y. The niche- fitness theory and its application to the systems of crop growth[J]. Journal of Landzhou university (Natural Sciences), 1993, 29(04): 219-224.

[13] 曾庆敏，刘新平. 天山北坡经济带宜耕未利用地开发潜力分区及评价——以新疆阜康市为例[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6):819-828.

Zeng Q M, Liu X P. Evaluation of potential of unused land exploitation in Northern Tianshan Mountain Economic Belt—A case study of Fukang City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6):819-828.

[14] 念沛豪，蔡玉梅，谢秀珍，等. 基于生态位理论的湖南省国土空间综合功能分区[J]. 资源科学, 2014, 36(09):1958-1968.

Nian P H, Cai Y M, Xie X Z, et al. Geographical space comprehensive function zoning in Hunan Province based on niche theory[J]. Resources Science, 2014, 36(09):1958-1968.

[15] 张俊峰，张安录. 基于生态位适宜度的农村居民点布局研究——以武汉市新洲区为例[J].自然资源学报, 2015, 30(5):725-735.

Zhang J F, Zhang A L. Study on Relationship between Spatial Heterogeneity of Land Resources and Economic Development:A Case Study of Wuhan Urban Agglomeration[J]. Journal of natural resources, 2015, 30(5):725-735.

[16] 秦天天，齐伟，李云强，等. 基于生态位的山地农村居民点适宜度评价[J]. 生态学报, 2012, 32(16):5175-5183.

Qin T T, Qi W, Li. Y Q, et al. Suitability evaluation of rural residential land based on niche theory in mountainous area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16):5175-5183.

[17] 赵素霞，牛海鹏，张捍卫，等. 基于生态位模型的高标准基本农田建设适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12):220-228.

Zhao S X, Niu H P, Zhang H W, et al. Suitability evaluation on high quality capital farmland consolidation based on niche-fitness model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12):220-228.

[18] Ouyang Z, Weisman J, Wang R. Ecological niche suitability model with an application in Taojiang land use planning [J]. Journal of Environmental

Science. 1994, 6(4): 449-456.

[19] 王慧敏. 闽北耕地整理前后的质量变化研究[D]. 福建: 福建农林大学, 2014.

Wang H M. Research on the Quality Variation Before and After Cultivated Land Consolidation in Northern Fujian-A Case Study of Jianou City[D]. Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.

[20] 张正峰, 陈百明, 郭战胜. 耕地整理潜力评价指标体系研究[J]. 中国土地科学, 2004, 18(05): 37-43.

Zhang Z F, Chen B M, Guo Z S. Indicator System for Evaluating Arable Land Consolidation Potential[J]. China Land Science, 2004, 18(05): 37-43.

[21] 郭姿含, 杨永侠. 基于 GIS 的耕地连片性分析方法与系统实现[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(03): 59-62.

Guo Z H, Yang Y X. GIS-Based Farmland Connectivity Analysis Methods Research and System Implementation[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(03): 59-62.

[22] 钱凤魁. 基于耕地质量及其立地条件评价体系的基本农田划定研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2011.

Qian F K. Study on the Planning of Basic Farmland Based on the Evaluation System of Farmland Quality and Site Conditions[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011.

[23] 于婧, 聂艳, 周勇, 等. 生态位适宜度方法在基于GIS的耕地多宜性评价中的应用[J]. 土壤学报, 2006, 43(02): 190-196.

Yu J, Nie Y, Zhou Y, et al. Niche-fitness theory and its application to GIS-based multi-suitability evaluation of cultivated land. [J]. Acta Pedologica Sinica. 2006, 43(02):190-196.

[24] 杨志恒. 基于Ward法的区域空间聚类分析[J]. 中国人口 资源与环境, 2010, 20(3):382-386.

Yang Z H. Region spatial cluster algorithm based on Ward Method[J]. China Population . Resources and Environment, 2010, 20(3):382-386.